

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СТАРЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Zn-Mg-Cu

© Е. А. Ханейчук

Дніпропетровський національний університет

Розглядаються проблеми мікролегування спеціальних алюмінієвих сплавів типу В93—В95 системи Al-Zn-Mg-Cu. Пояснюються принципи змінення сплавів системи.

Известно, что роль алюминиевых сплавов в качестве конструкционных материалов современной цивилизации возрастает, поскольку они позволяют эффективно решать несущие задачи практически всех отраслей народного хозяйства, включая острые экологические проблемы и энергосбережение. Анализ показывает, что конкурентоспособными оказываются материалы, технологии и оборудование, которые обновляются через 10—15 лет вместо 30—40 лет, как это было раньше.

Алюминиевые сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu являются наиболее высокопрочными сплавами, широко применяемыми в машиностроении. Отличительной характеристикой сплавов данной системы является многокомпонентность, что приводит к возможности упрочнения твердого раствора алюминия растворенными легирующими элементами, а также выделению из пересыщенного твердого раствора многочисленных интерметаллидных фаз, создающих эффект упрочнения при старении. Высокий комплекс свойств эти сплавы приобретают после деформации в сочетании с термической обработкой, заключающейся в гомогенизационном отжиге, закалке и старении. Однако закалка сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu может производиться в широком температурном интервале твердого раствора цинка и магния в алюминии, ограниченной температурой сольвуса и температурой пережога. Температуры сольвуса данных сплавов составляют 330—420 °C, а температуры пережога — 560—610 °C. Следовательно, температурный интервал нагрева под закалку может изменяться от 330 до 560 °C.

Термины «естественное» и «искусственное» старение являются условными, так как у некоторых сплавов естественное старение при комнатной температуре не происходит, и чтобы оно началось, требуется сильный подогрев. У сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu переход от естественного старения к искусственно наступает и при комнатной температуре, и при длительных выдержках (1—2 года).

Изменения свойств, который присущи естественному старению, вызваны образованием зон Гинье—Пристона. Искусственное старение связано с появлением частиц метастабильных фаз. В соответствии с этим было предложено заменить термины «естественное» и «искусственное» старение терминами «зонное» и «фазовое» старение для характеристики структурных изменений в сплаве. Зонное старение не приводит к разупрочнению сплава при любой длительности выдержки; фазовое старение может быть упрочняющим и разупрочняющим.

В работе методом электронной микроскопии изучены структурные превращения в сплаве В93, В95 в процессе старения, что позволило объяснить изменения прочностных характеристик сплава, его пластичность и чувствительность к коррозионному разрушению. Исходным материалами служили листы толщиной 2 мм (табл. 1).

Структуру сплава В93, В95 исследовали после закалки зонного и фазового старения. После закалки твердый раствор пересыщается не только растворенными атомами, но и вакансиями. В сплаве после закалки обнаружена дефектная структура в виде дислокационных петель и отдельных дислокаций.

Таблица 1. Химический состав высокопрочных алюминиевых сплавов В93, В95

Марка сплава	Содержание элементов, % мас.									
	Al	Zn	Mg	Cu	Mn	Zr	Fe	Si	Ti	Cr
B93	основа	6.5—7.3	1.6—2.2	0.8—1.2	—	—	0.2—0.4	0.2	—	—
B95	основа	5.0—7.0	1.8—2.8	1.4—2.0	0.4—0.6	—	0.5	0.5	—	0.1—0.2

Таблица 2. Влияние старения на механические свойства и коррозионную стойкость листов сплава В96

Режим старения	Механические свойства			Корро-зионная стойкость
	$\sigma_0$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %	
<b>Старение при комнатной температуре:</b>				
39 сут	440	270	11	6 мес
90 сут	460	290	11	6 мес
1 год	490	310	10	6 мес
4 мес +70 °C — 100 ч	500	410	12	6 мес
Старение при 100 °C — 96 ч	460	360	12	18 сут
Ступенчатое старение (60 °C — 24 ч + 195 °C — 2 ч)	430	340	10	24 сут
Ступенчатое старение +70 °C — 1000 ч	448	335	10	6 мес
Отжиг 350 °C — 2 ч	340	180	12	6 мес
Старение при 195 °C — 2 ч	360	190	14	6 мес

Наибольшая плотность петель получается после высокой температуры закалки от 550 °C, так как при этом образуется более пересыщенный вакансиями твердый раствор.

В табл. 2 приведены типичный механические свойства и коррозионная стойкость листов, состаренных после закалки от 460 °C в воду по различным режимам старения. Наибольшей прочностью обладает сплав после длительного старения при комнатной температуре. После выдержки в течение 1 года в сплаве формируются частицы метастабильной фазы.

Высокотемпературное старение сплава связано с интенсивным распадом твердого раствора внутри зерна. По имеющимся литературным данным, стабильная фаза  $T$  имеет решетку ГЦК с параметром 1.416 Н·м. Известно также, что фаза  $T$  образует обширную область твердых растворов Zn и Mg. Параметр фазы  $T$  непрерывно растет с увеличением содержания Al и Mg в пределах однородности фазы и может изменяться от 1.4129 до 1.471 Н·м.

Обнаружен различный характер распада твердого раствора после старения по режимам, указанным в табл. 1. После одного высокотемпературного старения в сплаве образуется небольшое количество фазы  $T$  и других интерметаллидов. В иных случаях образуются только частицы фазы  $T$ . Есть огромное различие в параметрах решетки фазы  $T$  и матрицы алюминия. Очевидно, что при низких температурах старения в затрудненных условиях образуется метастабильная фаза  $T$ . Ее образование облегчается присутствием зон Гинье—Престона. Частицы

фазы, зародившиеся в процессе высокотемпературного старения, являются стабильными и выделяются на дислокациях, так как упругие напряжения, возникающие при образовании фазы с большим объемом, чем матрица, могут быть скомпенсированы за счет энергии дислокации.

При зонном старении (20, 60 °C) выделяются зоны Гинье—Престона, часть которых растворяется при высокотемпературном старении, а другие перестраиваются в частицы метастабильной фазы  $T$ . В результате при увеличении длительности зонного старения плотность и дисперсность частиц фазы  $T$  растет.

С увеличением температуры старения до 200...350 °C в сплаве начинается процесс растворения фазы  $T$  и выделения интерметаллидных фаз  $Al_3Mg_2$ , при этом снижается прочность и повышается пластичность.

В процессе длительного старения при температуре 20 °C происходит выделение метастабильной фазы  $T$ . Старение при температуре 200 °C приводит к образованию большого количества выделений фазы  $T$  и небольшого количества фазы  $Al_3Mg_2$ . Однако при предварительном придельном зонном старении и последующем старении при 200 °C могут образовываться частицы метастабильной фазы  $T$ , природа которой требует дополнительного исследования.

Установлено, что наибольшей прочностью сплавы B93, B95 обладают после длительных выдержек при комнатной температуре, когда частицы метастабильной фазы  $T$  выделяются как внутри, так и по границам зерен.

Предварительное длительное зонное старение с последующим фазовым старением приводит к созданию дисперсных выделений метастабильной фазы  $T$ , равномерно распределенных по полю зерна, что сказывается на повышении прочности сплава.

Повышение чувствительности сплава к коррозии под напряжением связано с выделением по границам зерен мельчайших частиц метастабильной фазы  $T$ . После ступенчатого старения даже с дополнительным нагревом при 70 °C сплав коррозионному растрескиванию не подвержен.

#### INVESTIGATION OF KINETICS OF AGING AN ALUMINIUM ALLOY OF THE Al-Zn-Mg-Cu SYSTEM

E. A. Khaneichuk

We discuss the problem of microdoping special aluminium alloys of the B93-B95 types of the Al-Zn-Mg-Cu system. The investigation results explaining principle of hardening the system under investigation are presented.